



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# **VLIV POVRCHOVÝCH ÚPRAV NA ÚNAVOVOU ŽIVOTNOST**

INFLUENCE OF SURFACE MODIFICATIONS ON FATIGUE LIFE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MATÚŠ GEREC**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. JAN VOPAŘIL**

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního  
inženýrství Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Matúš Gerec

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vliv povrchových úprav na únavovou životnost**

v anglickém jazyce:

### **Influence of surface modifications on fatigue life**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést rešerši povrchových úprav využívaných pro vysokocyklicky namáhané součásti s důrazem na moderní trendy, komplexně zhodnotit jejich přínosy z hlediska možného prodloužení únavové životnosti a objasnit aplikaci změn mechanických vlastností do různých metod výpočtu predikce únavové životnosti.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše povrchových úprav
2. Popis vlivu povrchových úprav na únavovou životnost
3. Popis postupu zahrnutí povrchových úprav do výpočtu únavové životnosti

Seznam odborné literatury:

- [1] KOŽOUŠEK, J. Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1983. 483 s.
- [2] BEDNÁŘ, B. Technologičnost konstrukce. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2005. 146 s.
- [3] PÍŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J. Pevnost a životnost. Vyd. 1. Brno : VUT Brno, 1993. 205 s. ISBN 80-214-0474-4.
- [4] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P. Fatigue of metallic materials. Academia, Praha, 1992. 239 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Vopařil

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

---

*prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.*  
*Ředitel ústavu*

---

*doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.*  
*Děkan fakulty*



## ABSTRAKT

Táto bakalárska práca predkladá popis technológie povrchových úprav využívaných u dynamicky namáhaných strojných súčastí. Zaoberá sa popisom vplyvu jednotlivých povrchových úprav na únavovú životnosť vo vysokocyklickej oblasti. Ďalej popisuje postup pri analytickom odhade medze únavy skutočnej súčasti a postup pri dimenzovaní súčasti na trvalú únavovú pevnosť.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Únavová životnosť, povrchová úprava, medza únavy, cyklické zaťažovanie

## ABSTRACT

This bachelor thesis presents the description of surface treatment technologies used on dynamically loaded mechanical parts. It explains the influence of each surface treatment on high-cycle fatigue life. Then the thesis describes the analytical calculation of fatigue limit of real part and approach to design of mechanical part on infinite life.

## KEYWORDS

Fatigue life, surface treatment, fatigue limit, cyclic loading



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

Gerec, M. *Vliv povrchových úprav na únavovou životnost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 37 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vopařil



## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Vopařila a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brně dne 29. května 2015

.....

Matúš Gerec



## POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať Ing. Janu Vopařilovi za ochotu, nasmerovanie a cenné rady, ktoré mi poskytol pri vypracovávaní bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať mojim rodičom za podporu počas celého štúdia.



## OBSAH

Úvod .....	9
1 Únava materiálu.....	10
1.1 Charakteristika únavového zaťažovania .....	10
1.2 Dynamicky namáhané súčasti.....	11
1.3 Základné diagramy únavovej pevnosti .....	12
1.3.1 Wöhlerova krivka .....	12
1.3.2 Haighov Diagram .....	13
1.3.3 Smithov diagram .....	15
2 Medza únavy.....	16
2.1 Medza únavy reálnej súčasti .....	17
2.2 Vplyv akosti povrchu a povrchových úprav na únavovú životnosť .....	18
3 Mechanické úpravy povrchu .....	20
3.1 Abrázívne metódy obrábania (dokončovania) .....	20
3.1.1 Brúsenie .....	20
3.1.2 Superfínišovanie .....	21
3.2 Beztrieskové dokončovacie metódy .....	21
3.2.1 Valčekovanie .....	21
3.2.2 Guličkovanie.....	22
4 Tepelné úpravy povrchu .....	23
4.1 Povrchové Kalenie plameňom .....	23
4.2 Povrchové kalenie indukčnými prúdmi .....	24
4.3 Povrchové kalenie laserom .....	24
5 Chemicko-tepelné úpravy povrchu.....	25
5.1 Cementácia.....	25
5.2 Nitridácia .....	25
6 DLC vrstvy .....	26
7 Dimenzovanie na únavu .....	27
7.1 Trvalá pevnosť–jednoduché namáhanie .....	27
7.2 Trvalá pevnosť–kombinované namáhanie.....	30
7.2.1 Empirické kritéria .....	30
7.2.2 Kritéria vychádzajúce z kritickej roviny .....	31
7.3 Voľba súčiniteľov bezpečnosti .....	32
Záver.....	33
Zoznam použitých skratiek a symbolov .....	36





## ÚVOD

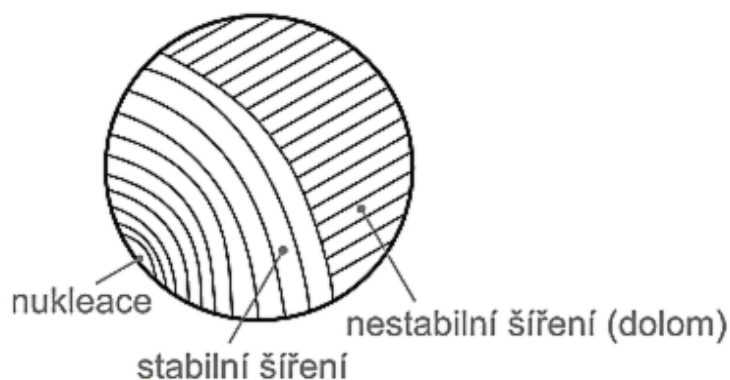
Požiadavky na moderné motory ako vyšší výkon, nižšia spotreba a stým súvisiaca nižšia hmotnosť jednotlivých častí motoru sa stále zvyšujú. Podstatnými faktormi sú aj vysoká spoľahlivosť, životnosť a čo možno najnižšie výrobné náklady. To vedie k neustálej inovácii v oblasti použitých materiálov, konštrukčného riešenia jednotlivých dielov a technológie ich výroby.

Najčastejšou príčinou poruchy strojných súčastí je únava materiálu. Tento jav vzniká ako dôsledok cyklického namáhania telesa vyvolaného častými zmenami zaťaženia. V technickej praxi sa stretávame s veľkým množstvom vysokocyklicky namáhaných mechanických súčastí. Sú to väčšinou práve časti motorov ako hriadele, ojnice, ozubené kolesá a pod. Vzhľadom k charakteru únavového procesu má stav povrchovej vrstvy materiálu zásadný vplyv na únavové vlastnosti súčastí. Práve preto sa v súčasnosti venuje významná pozornosť rozličným povrchovým úpravám s cieľom predĺženia únavovej životnosti.

Táto práca sa zaoberá popisom únavového namáhania a postupom dimenzovania súčastí na neobmedzenú životnosť v oblasti vysokocyklickej únavy. Ďalej sa venuje jednotlivým technológiám povrchových úprav, využívaných k zvýšeniu únavovej pevnosti.

# 1 ÚNAVA MATERIÁLU

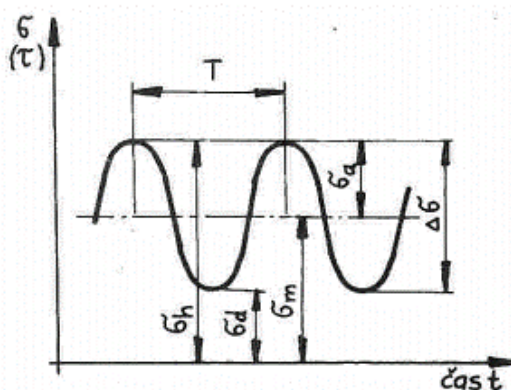
Väčšina strojných súčasti je namáhaná cyklickým zaťažením. Pri takomto type namáhania je maximálna hodnota vyvolaného napätia výrazne nižšia než statická pevnosť materiálu aj jeho medza sklzu a kmitavé zaťaženie je aplikované opakovane po veľmi dlhú dobu. Medzným stavom únavy materiálu je definovaný stav, keď v dôsledku časovo premenných dynamických zaťažení dôjde k poruche funkčnej spôsobilosti súčasti (tzv. únavový lom). [2] Tento stav spôsobuje v prevádzke strojných súčasti až 90% všetkých porúch. V prvej fáze únavového porušenia dochádza ku zmene mechanických vlastností v celom objeme zaťažovaného prierezu. Nasleduje intenzívna lokalizácia plastických deformácií v malých objemoch povrchovej vrstvy, sprevádzaná nukleáciou mikroskopických trhlín. V poslednej fáze nastáva vznik magistrálnej trhliny a jej šírenie v smere kolmom k maximálnemu hlavnému napätiu vedúce k únavovému lomu. [1][2]



Obr. 1 Schéma šírenia únavovej trhliny [24]

## 1.1 CHARAKTERISTIKA ÚNAVOVÉHO ZAŤAŽOVANIA

Kmitavé zaťaženia, ktorými sú stroje v prevádzke namáhané majú v čase obvykle stochastický (náhodný) priebeh, čo je značne zložité pre výpočty. Preto sa pre účely únavového posudzovania využíva schematizácia priebehu súbormi harmonických kmitov. [4] Takýto priebeh napätia, vznikajúci napr. v rotujúcom hriadeľi popisuje Obr. 2. [1]



Obr. 2 kmit napätia [1]

,kde

$\sigma_h$  – horné napätie kmitu,

$\sigma_d$  – dolné napätie kmitu,

$\sigma_m$  – stredné napätie kmitu,

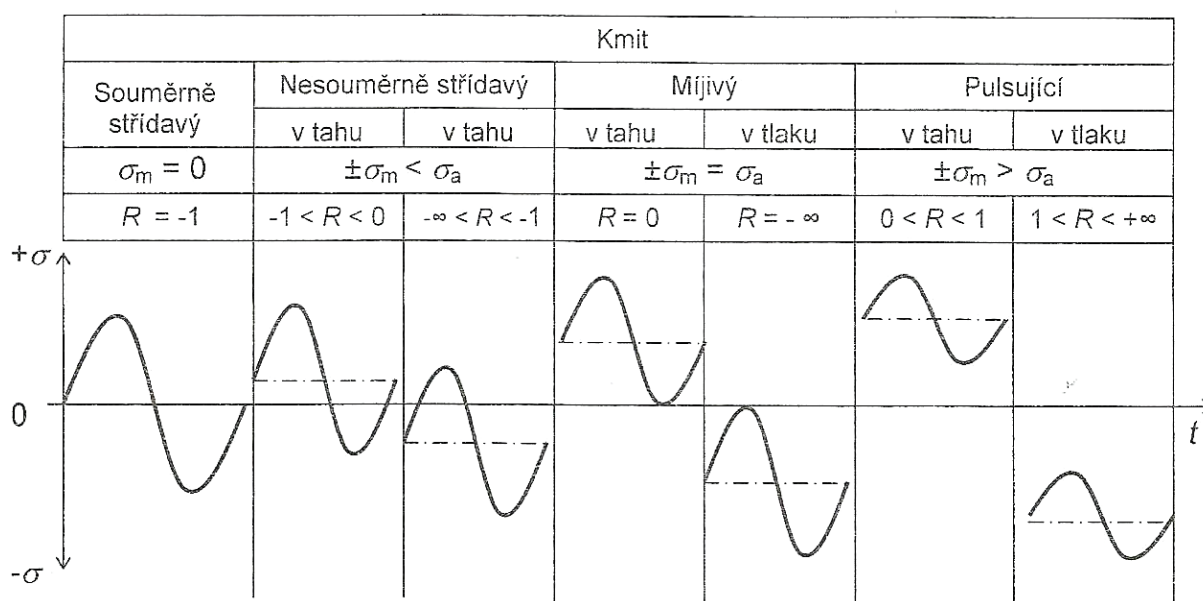
$\sigma_a$  – amplitúda napätia (výkmit),

$\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$  – rozkmit,

$T$  –perióda kmitu.

Veľkosť každého kmitu sa dá popísať dvojicou z uvedených hodnôt, najčastejšie  $\sigma_a$ – $\sigma_m$ , prípadne  $\sigma_d$ – $\sigma_h$ . K popisu kmitu sa používa tzv. koeficient nesúmernosti (asymetrie) kmitu. [1]

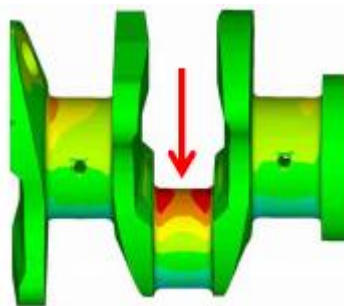
$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}. \quad (1)$$



Obr. 3 Typy kmitov podľa nesúmernosti [2]

## 1.2 DYNAMICKY NAMÁHANÉ SÚČASTI

Typické únavovo namáhané súčasti sú časti kľukového mechanizmu motorov. Cyklické zaťaženie vzniká súčasným pôsobením síl od tlaku plynov vo valci a zotrvačných síl. V kľukových hriadeľoch tieto sily vyvolávajú kombinované namáhanie na ohyb a krut. Nebezpečné miesto je prechod čapu do ramena kľuky. Ojnica je podrobená zložitejšiemu namáhaniu jednotlivých častí. Driek ojnice je dynamicky namáhaný v ťahu, tlaku a ohybe a kontroluje sa aj na vzpernú stabilitu. Zotrvačná sila hmotnosti piestu namáha oko ojnice na ťah. Rozdiel najväčšej sily od tlakov plynov pri expanznom zdvihu a zotrvačnej sily namáha oko ojnice na tlak. V hlave ojnice vzniká kombinácia normálového a šmykového napätia od zotrvačných síl. Ojničné skrutky s predpätím sú namáhané pulzujúcim ťahom. [21]



*Obr. 4 Priebeh napätia v kľuke hriadeľa v nebezpečnom mieste [22]*

Medzi ďalšie dynamicky namáhané súčasti patria ozubené kolesá, ktoré sú namáhané ohybom v päte zubu. Špecifickým prípadom je únava v dotyku. Takéto namáhanie vzniká od kontaktných tlakov dotýkajúcich sa telies a je typické pre ozubené kolesá a ložiská. Pri únave v dotyku nedochádza ku klasickému únavovému lomu, ale nastáva vydrobovanie materiálu z povrchu súčasti, tzv. pitting. [2]

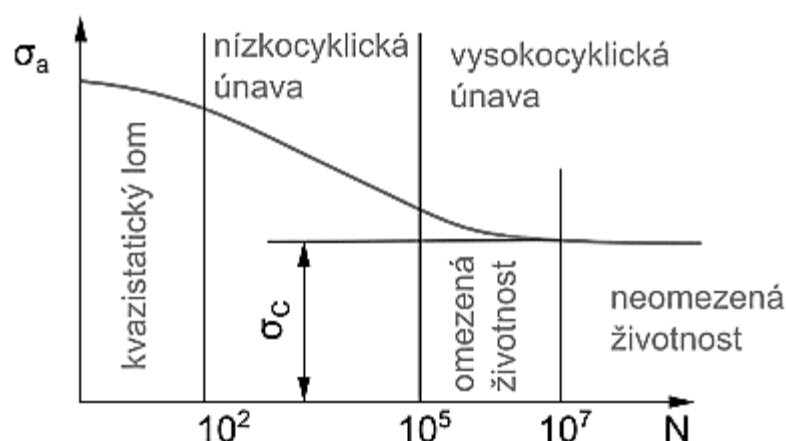


*Obr. 5 Pitting na dotkových plochách ozubenia [23]*

## 1.3 ZÁKLADNÉ DIAGRAMY ÚNAVOVEJ PEVNOSTI

### 1.3.1 WÖHLEROVA KRIVKA

K posudzovaniu základných únavových vlastností strojných súčasti slúži Wöhlerova krivka (S–N krivka). Je to závislosť amplitúdy napätia  $\sigma_a$  ustáleného harmonického zaťažovania hladkého dokonale opracovaného skúšobného vzorku na počte cyklov do poruchy  $N$  pri konštantnom strednom napätí  $\sigma_m$ . [3] Najčastejšie sa využíva Wöhlerova krivka v tvare  $\sigma_a - \log N$ . Podľa veľkosti amplitúdy napätia rozdelujeme Wöhlerovu krivku na oblasť trvalej pevnosti (neobmedzená životnosť) a časovanej pevnosti (obmedzená životnosť). Hranicou týchto oblastí je medza únavy  $\sigma_c$ . Je to amplitúda kmitavého napätia, pri ktorej vykazuje súčasť teoreticky nekonečnú životnosť.



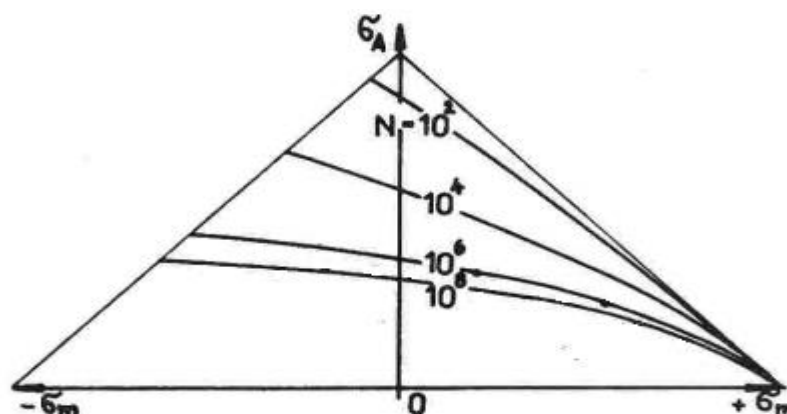
Obr. 6 Wöhlerova krivka, členenie oblasti únavy [24]

Z hľadiska počtu kmitov do lomu rozdeľujeme únavový proces na tri typické oblasti [1]:

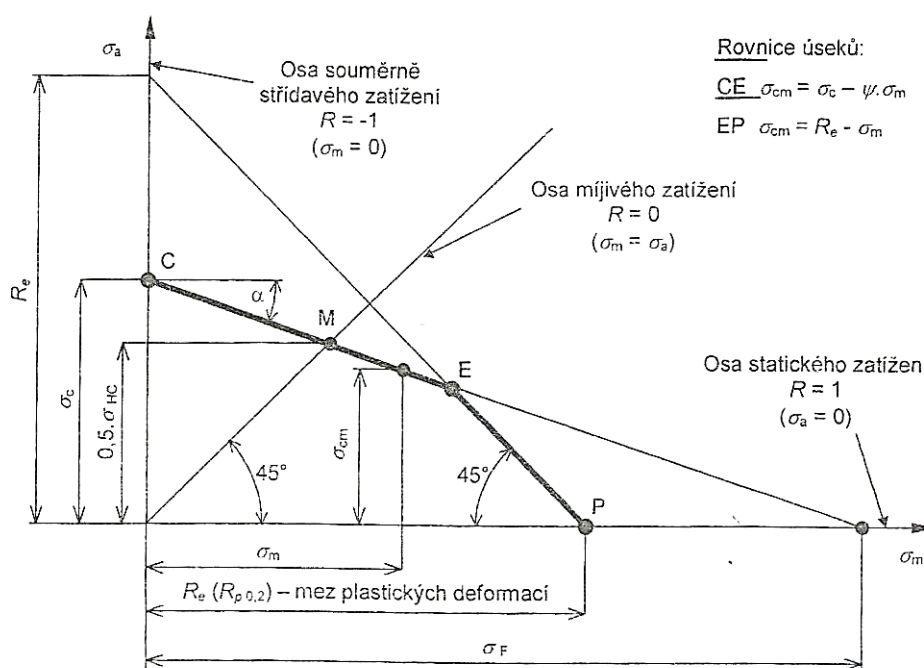
- Oblasť kvazistatického lomu, v ktorej dôjde k porušeniu už po niekoľkých desiatkach cyklov ( $N < 10^2$ ). Nejedná sa o únavový lom, pretože rast lomovej plochy je veľmi rýchly a má charakter tvárneho lomu, rovnako ako pri statickom porušení, t. j. prekročením medze pevnosti  $R_m$ .
- Oblasť nízko- a vysokocyklickej únavy spadá do životnosti v rozmedzí  $10^2$  až  $10^5$  cyklov. Napätia v telese sú tak veľké, že vznikajú cyklické plastické deformácie materiálu. Lom v tejto oblasti má hrubšiu štruktúru s interkryštalickým priebehom lomu a výraznými stopami po plastickej deformácii.
- Oblasť vysokocyklickej únavy popisuje životnosť vyššiu ako  $10^5$  cyklov. Táto oblasť sa delí na obmedzenú životnosť ( $10^5 < N < 10^7$ ) a neobmedzenú životnosť (pre väčšinu konštrukčných ocelí  $N > 10^7$ ). Pokiaľ nastane lom je charakterizovaný hladkým vzhľadom a transkryštalickou štruktúrou bez zjavných známkov plastickej deformácie. Je ľahko rozpoznateľný od zvyšnej časti lomovej plochy, ktorá sa vytvorí kvazistatickým dotrhnutím prierezu s podielom plastických deformácií.

### 1.3.2 HAIGHOV DIAGRAM

Wöhlerove krivky životnosti pri rôznych hodnotách stredného napätia  $\sigma_m$  nám ukazujú, že existuje závislosť medznej amplitúdy kmitu  $\sigma_a$  pri poruche na strednom napätí. Túto závislosť definuje Haighov diagram. Zvýraznená línia na Obr. 8 vyznačuje oblasť bezpečnosti (pre  $N > 10^7$ ). Pre všetky kombinácie veľkosti cyklov dané hodnotami  $\sigma_a$  a  $\sigma_m$ , ktoré ležia pod touto líniou teoreticky nedôjde k poruche [2]. Medza únavy  $\sigma_c$  s rastúcim ťahovým predpätím  $\sigma_m$  klesá. Pre tlakové predpätia sa dokonca prejaví nárast časovanej pevnosti. Preto sa sleduje vplyv  $\sigma_m$  hlavne v ťahovej oblasti. [1]



Obr. 7 Haighov diagram pre rôznu životnosť [1]



Obr. 8 Konštrukcia zjednodušeného Haighovho diagramu pre hladkú vzorku namáhanú ťahom [2]

,kde

$$\psi = tg\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_F} - \text{citlivost' k asymetrii cyklu,}$$

$\alpha$  – uhol podl'a Obr. 8,

$\sigma_c(\sigma_{oc}, \tau_c)$  – medza únavy pre ťah (ohyb, krut),

$\sigma_F$  – fiktívne napätie.

Pri konštrukcii Haighovho diagramu volíme citlivosť k asymetrii cyklu  $\psi$  buď podľa Tab. 1, alebo fiktívne napätie  $\sigma_F$  podľa skúseností. [2]

$$\sigma_F = R_m - \text{pre t'ah},$$

$$\sigma_F = (1,5 \div 1,7) \cdot R_m - \text{pre ohyb},$$

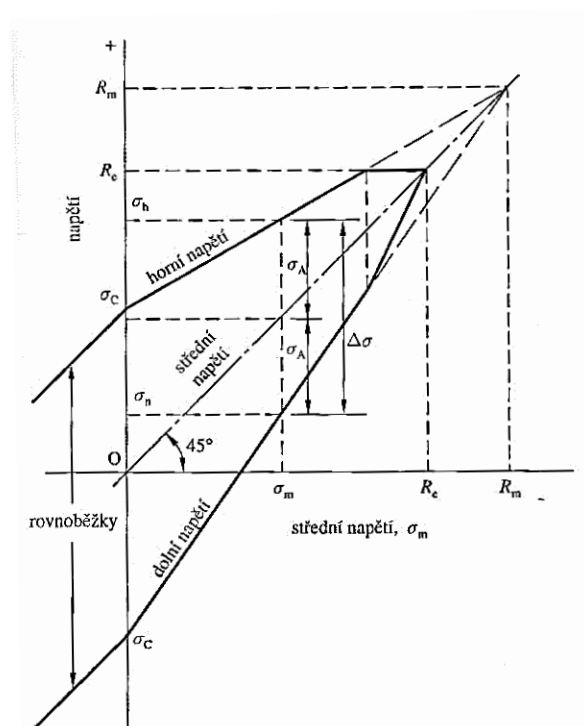
$$\tau_F = (0,7 \div 0,8) \cdot R_m - \text{pre krut.}$$

Tab. 1 Citlivosť k asymetrii cyklu [2]

medza pevnosti $R_m$ [Mpa]		350÷550	550÷750	750÷1000	1000÷1200
$\psi$	t'ah–tlak, ohyb	0,1	0,15	0,2	0,25÷0,3
	Krut	0,05	0,10	0,15	0,15÷0,25

### 1.3.3 SMITHOV DIAGRAM

Pre vyjadrenie závislosti medze únavy  $\sigma_c$  na strednom napätí (predpätí)  $\sigma_m$  sa taktiež využíva Smithov diagram. Ide o závislosť horného napätia na strednom napätí. Jedná sa o Haighov diagram, ktorého vodorovná osa je pootočená o  $45^\circ$  proti smeru hodinových ručičiek. Takisto ako v Haighovom diagrame, značí zvýraznená krivka hranicu bezpečnosti, pod ktorou teoreticky nedôjde k poruche.

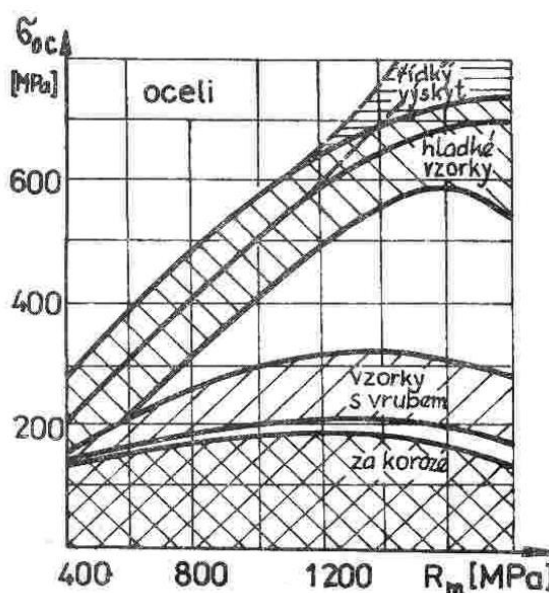


Obr. 9 Zjednodušená konštrukcia Smithovho diagramu [3]



## 2 MEDZA ÚNAVY

Ako už bolo spomenuté v kapitole 1.3, medza únavy materiálu  $\sigma_c$  je hodnota amplitúdy napätia, pod ktorou nedôjde k únavovému porušeniu bez ohľadu nato aký veľký počet cyklov bude aplikovaný. Stanovenie medze únavy pomocou únavových skúšok je dnes rutinný, avšak zdĺhavý postup. Pre predbežné výpočty, návrhy prototypov a tiež pre niektoré analýzy porúch je dobre mať k dispozícii rýchlu metódu odhadu medze únavy. [3] Literatúra sa najčastejšie zaoberá závislosťou medze únavy a statickej pevnosti materiálu. Na základe množstva kvantitatívnych údajov týkajúcich sa výsledkov únavových skúšok v ohybe za rotácie a statických ťahových skúšok prevedených na rovnakých vzorkách sa došlo k viacerým záverom. Cenným poznatkom je, že u bežných konštrukčných ocelí s rastom statickej pevnosti rastie aj pevnosť únavová. To neplatí pre oceli z vyššou pevnosťou ( $R_m > 1460 \text{ MPa}$ ) ani pre zliatiny hliníku. [1]



Obr. 10 Obvyklá závislosť medze únavy v ohybe na pevnosti  $R_m$  u ocelí [1]

Korelačné vzťahy medzi medzou únavy a medzou pevnosti pre rôzne materiály uvádzajú viacerí autori s menšími rozdielmi v literatúre [1],[2] a [3]. Tab. 2 uvádza korelačné vzťahy pri malej pravdepodobnosti poruchy ( $P=1\%$ ) pre konštrukčné oceli.

Tab. 2 Približné vzťahy pre odhad medzi únavy konštrukčných ocelí [1]

Typ namáhania	Medza únavy oceli
Striedavý ťah– tlak	$\sigma_c = 0,35 \cdot R_m$
Míjivý ťah	$\sigma_{hc} = 0,61 \cdot R_m$
Striedavý ohyb	$\sigma_{co} = 0,43 \cdot R_m$
Striedavý krut	$\tau_c = 0,3 \cdot R_m$





Takto odhadnuté medze únavy budú mať pravdepodobne veľký rozptyl a ich hodnoty sa môžu značne líšiť od výsledkov vlastných laboratórnych skúšok prevedených na vzorkách za presne špecifikovaných podmienok. Táto skutočnosť sa pri návrhu súčasti kompenzuje zavedením vyšších návrhových súčiniteľov. [2]

## 2.1 MEDZA ÚNAVY REÁLNEJ SÚČASTI

Medza únavy skutočného konštrukčného dielu sa nebude zhodovať s medzou únavy stanovenou z únavových skúšok normovaného vzorku materiálu. Medzi dôvody, ktoré sú príčinou odlišnosti oboch zmienených veličín, zahrňujeme [3]:

- materiál: chemické zloženie, štruktúra
- technológia výroby: metódy, tepelné spracovanie, korózia trením, drsnosť povrchu, výrobné trhliny (po brúsení alebo kalení), povrchové a vnútorné pnutia
- okolité vplyvy: korózia, teplota, stav napätosti, relaxácia napätia
- konštrukčný návrh súčasti: tvar, veľkosť, geometrické vruby (koncentrátory napätia), rýchlosť, trenie

Experimentálne stanovenie medze únavy konkrétnej súčasti je časovo a finančne veľmi náročné. Preto sa k jej určeniu využíva prepočet z medze únavy vzorky. K takémuto odhadu sa v literatúre uvádza viacero koncepcií. Jednou z nich je prepočet pomocou Marinovej rovnice. Všetky vyššie spomenuté vplyvy sú zahrnuté v podobe uvedených súčiniteľov [3]:

$$\sigma'_{co} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{co}, \quad (2)$$

kde

$k_a$  – súčiniteľ vplyvu akosti povrchu,

$k_b$  – súčiniteľ vplyvu veľkosti telesa,

$k_c$  – súčiniteľ vplyvu spôsobu zaťažovania,

$k_d$  – súčiniteľ vplyvu teploty,

$k_e$  – súčiniteľ spoľahlivosti,

$k_f$  – súčiniteľ zahrňujúci ďalšie vplyvy,

$\sigma_{co}$  – medza únavy skúšobnej tyče v ohybe za rotácie,

$\sigma'_{co}$  – korigovaná medza únavy v kritickom mieste súčasti.

Zníženie medze únavy u vrubových súčasti spôsobuje koncentrácia napätia v mieste vrubu. Vplyv vrubu zahrnieme do rovnice (2) tak, že podelíme základnú medzu únavy vrubovým súčiniteľom  $\beta$ . Iná koncepcia pre výpočet medze únavy vrubových súčasti pri symetrickom harmonickom zaťažovaní je vyjadrená vzťahmi:

Pre ťah (tlak):

$$\sigma_c^* = \frac{\sigma_c \cdot \varepsilon_v \cdot \eta_p}{\beta}. \quad (3)$$

Pre ohyb:



$$\sigma_{co}^* = \frac{\sigma_{co} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po}}{\beta_o} \quad (4)$$

Pre krut:

$$\tau_c^* = \frac{\tau_c \cdot \varepsilon_{vk} \cdot \eta_{pk}}{\beta_k} \quad (5)$$

kde

$\varepsilon$  – súčiniteľ veľkosti súčasti,

$\eta_p$  – súčiniteľ povrchu,

$\beta$  – súčiniteľ vrubu,

$\sigma_c^*(\sigma_{co}^*, \tau_c^*)$  – medza únavy v ťahu vrubovej súčasti (v ohybe, v krute).

## 2.2 VPLYV AKOSTI POVRCHU A POVRCHOVÝCH ÚPRAV NA ÚNAVOVÚ ŽIVOTNOSŤ

Keďže nukleačná fáza únavových trhlín prebieha v povrchovej vrstve materiálu, je únavový proces podstatne ovplyvnený jej vlastnosťami [6]:

- Textúra povrchu, pretože ovplyvňuje iniciáciu únavovej trhliny, zvlášť pri materiáloch citlivých na vrub a pri vysokocyklickej úrave.
- Stav zvyškových napätí, ktoré vznikajú v povrchovej vrstve po technologickej operácii. Všeobecne platí, že pri ťahovom pnutí v povrchovej vrstve sa medza únavy znižuje. Naopak prítomnosť tlakového pnutia, ktoré pôsobí proti ťahovej amplitúde zaťažovacieho cyklu zabraňuje otváraniu trhlín a tým zvyšuje únavovú pevnosť.
- Štruktúra povrchovej vrstvy, pretože únavové trhliny vyčerpajú väčšinu svojej životnosti v povrchovej vrstve, kde má veľký vplyv mikroštruktúra tejto vrstvy alebo orientácia zŕn.

Na spomenuté vlastnosti povrchovej vrstvy má rozhodujúci vplyv technológia vytvárania súčasti (trieskové obrábanie, tvárenie, odlievanie), okolité prostredie a technológia finálneho spracovania povrchu. [5] K rozdeleniu a popisu jednotlivých technológií povrchových úprav sa bližšie venujú kapitoly 3. až 6.

Vplyv stavu povrchu na únavovú pevnosť je nemožné jednoznačne vyčíslit' a musí sa určovať experimentálne. Pre potreby výpočtov je často vyjadrený pomocou súčiniteľa povrchu v tvare [5]:

$$\eta_p = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (6)$$

kde

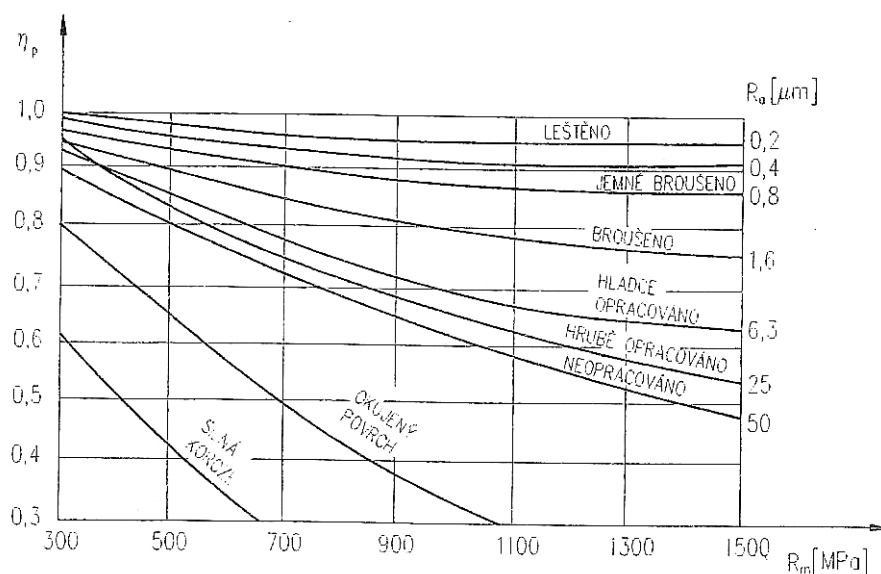
$\eta_1$  – súčiniteľ akosti povrchu,

$\eta_2$  – súčiniteľ technologickej úpravy povrchovej vrstvy.

Súčiniteľ  $\eta_1$  je závislý na strednej aritmetickej hodnote drsnosti povrchu, ktorá je daná finálnym spôsobom opracovania. Tento súčiniteľ definujeme ako pomer hodnôt medze únavy sledovaného telesa s danou drsnosťou povrchu a normovanej etalónovej brúsenej tyče so štandardnou akosťou povrchu. Diagram na *Obr. 11* platí pre namáhanie ťahom a ohybom. Pre krut sa uvažuje zmiernenie účinku podľa vzťahu (7).



$$\eta_{1\tau} = 0,5 \cdot (1 + \eta_1) . \quad (7)$$



Obr. 11 Súčiniteľ akosti povrchu  $\eta_1$  [2]

Súčiniteľ  $\eta_2$  definujeme ako pomer medze únavy povrchovo spracovanej tyče pre danú technológiu ku medzi únavy normovanej tyče.

Tab. 3 Približné hodnoty súčiniteľa povrchovej úpravy  $\eta_2$  [5]

Spôsob povrchovej úpravy	$d$ [mm]	$R_m$ [Mpa]	$\eta_2$		
			$\beta=1$	$\beta=1,5$	$\beta=1,8-2$
Kalenie		600–800	1,5–1,7	1,6–1,7	2,4–2,8
Vysokofrekvenčné kalenie	10–20	800–1100	1,3–1,5		
	30–40		1,2–1,5		1,5–2,5
Nitridácia (hĺbka vrstvy 0,01-0,04)		900–1200	1,1–1,25	1,5–1,7	1,7–2,1
		400–600	1,8–2,0		
Cementovanie	8–40	700–800	1,4–1,5	2,0	
	8–40	1000–1200	1,2–1,3		
Guličkovanie		600–1500	1,1–1,25	1,5–1,6	1,7–2,1
Valčekovanie	17–130		1,1–1,3	1,3–1,5	1,6–2,0



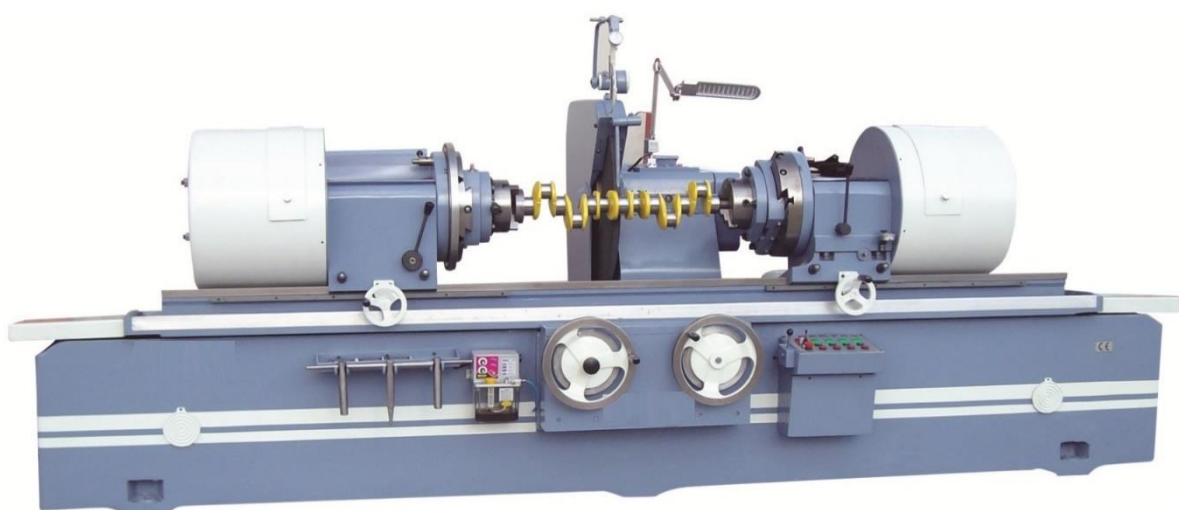
## 3 MECHANICKÉ ÚPRAVY POVRCHU

### 3.1 ABRAZÍVNE METÓDY OBRÁBANIA (DOKONČOVANIA)

Sú charakterizované použitím nástrojov s nedefinovanou geometriou britu. U abrazívnych metód dokončovania dochádza k úberu materiálu. Uplatňujú sa pri výrobe strojárenských súčasti, na ktoré sú kladené vysoké nároky na tvarovú a rozmerovú presnosť, drsnosť (akosť) povrchu. Dôležitým faktorom je aj pozitívny priebeh zvyškových napätí na povrchu po obrobení. Medzi tieto operácie radíme brúsenie, lapovanie, honovanie a superfinišovanie. [7]

#### 3.1.1 BRÚSENIE

V súčasnosti je brúsenie najčastejšie využívaná metóda v strojárenskom priemysle. V automobilovej výrobe tvoria brúsky a ďalšie dokončovacie obrábacie stroje 25% a vo výrobe valivých ložísk až 60% všetkých obrábacích strojov. Je to metóda obrábania, pri ktorej sa materiál z povrchu obrobku oddeľuje otáčajúcim sa mnohoklinovým nástrojom, najčastejšie brúsnym kotúčom za účelom dosiahnutia vysokej rozmerovej presnosti, správnosti geometrického tvaru a veľmi dobrej akosti povrchu. Brúsný kotúč je tvorený zrnami brusiva-tvrdeho materiálu (oxid hlinitý– $\text{Al}_2\text{O}_3$ , karbid kremíku– $\text{SiC}$ , diamant, kubický nitrid bóru), ktoré sú spojené spojivom. Moderným trendom sú brúsiace materiály na bázi vysokoporéznych brúsiacich materiálov, sintrovaných korundov. [7][9] Z hľadiska únavy je pri brúsení dôležitá drsnosť povrchu a reziduálne napätia po obrobení, ktorých vznik je výsledkom veľkých tlakov a tepla generovaného počas brúsenia. To ako tieto faktory obrobenej plochy ovplyvnia výslednú kvalitu povrchovej vrstvy a tým aj únavovú životnosť súčasti závisí od voľby brúsiacich podmienok–vlastností brúsiaceho kotúča, rezné podmienky brúsenia, spôsob brúsenia, vlastností obrobku, stav stroja apod. Správna voľba brúsiacich podmienok zaručí čo možno najlepšie prevádzkové vlastnosti súčasti. Pri týchto podmienkach sa reziduálne napätia pozitívne rozdelia. Ťahové napätia v povrchovej vrstve sa zmenia na tlakové a to zvýši únavovú životnosť obrobku. Naopak nepriaznivá voľba rezných podmienok únavovú životnosť zníži. [9][10]



Obr. 12 Brúsenie kľukového hriadeľa [11]



### 3.1.2 SUPERFINIŠOVANIE

Superfinišovanie je špecifický druh brúsenia, pri ktorom sa z dokončovaného povrchu odstraňujú vrcholky nerovností abrazívnym účinkom veľmi jemných zŕn superfinišovacích kameňov. Je to vysoko produktívna metóda dokončovacieho obrábania vonkajších aj vnútorných rotačných, tvarových a rovinných plôch, pri ktorej sa dosahuje vysokej presnosti a nízkej drsnosti povrchu až do  $Ra = 0,0125\mu\text{m}$ . [7] Superfinišovanie má hrubovacíu a leštiacu fázu. Používajú sa superfinišovacie kamene s brusivom z umelého korundu a keramikou alebo bakelitovou väzbou pre superfinišovanie ocelí, s brusivom karbidu kremíku pre superfinišovanie zliatiny a ocelí nižších pevností, nehrdzavejúcich ocelí, neželezných kovov a zliatin. Pre superfinišovanie vysoko legovaných ocelí sa používa kubický nitrid bóru v keramickej väzbe, pre slinované karbidy syntetický diamant v organickej väzbe. Najväčšie uplatnenie má u súčastí v automobilovom priemysle u valivých ložísk. [9]

## 3.2 BEZTRIESKOVÉ DOKONČOVACIE METÓDY

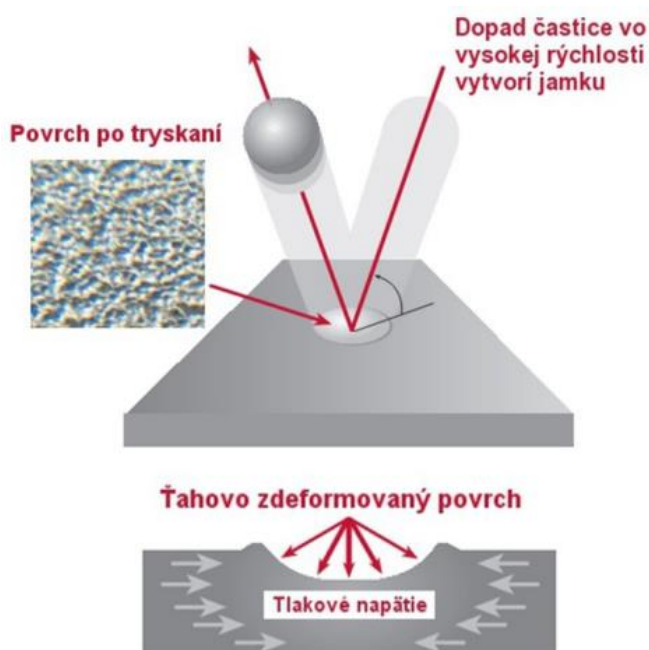
Beztrieskové metódy dokončovania obrobených plôch spočívajú v plastickej deformácii povrchovej vrstvy obrobku (súčasti). Plastickej deformácii prebieha do hĺbky niekoľkých stotín až desiatín milimetra, čím dochádza k zlepšeniu parametrov štruktúry povrchu a ku zvýšeniu pevnosti a tvrdosti. V povrchovej vrstve vznikajú priaznivé tlakové zvyškové napätia, ktoré majú za následok zvýšenie medze únavy, odolnosti proti opotrebeniu a odolnosti proti korózii opracovanej súčasti. Medzi tieto metódy radíme guľčkovanie, balotínovanie, valčekovanie a hladenie. [7]

### 3.2.1 VALČEKOVANIE

Podstata tejto technologickej metódy dokončovania spočíva v pôsobení tvrdého tvarovacieho prvku (guľčička, valček, kotúč, hladiaci tŕň a pod.), ktorý je k povrchu strojnej súčasti pritlačovaný konštantnou silou (statické valčekovanie), alebo na povrch pôsobí dynamickými rázmi (dynamické valčekovanie). Veľkosť pritlačnej sily závisí na materiáli súčasti a pohybuje sa v rozmedzí 500 až 5000N. [7] Tlak vyvolaný v mieste styku povrchu tvarovanej súčasti a tvarovacieho nástroja spôsobuje plastickej deformácii. V tomto mieste vzniká tlakový klin, ktorý má za následok postupné znižovanie vrcholov mikronerovností od predchádzajúceho opracovania a ich presunutie do priehlbín týchto mikronerovností. Pri zachovaní správneho technologického postupu a optimálnej veľkosti tlaku sa dosahuje vysoký stupeň vyhladenia povrchu. Ďalším efektom tejto metódy je spevnenie povrchovej vrstvy materiálu, ktorej hĺbka je oproti guľčkovaniu väčšia,  $(0.3 \div 1)$  mm. Zvyšuje sa pevnosť, tvrdosť a nepriaznivé ťahové zvyškové pnutia z predchádzajúceho obrábania sa menia na tlakové až do veľkosti 800Mpa. [2] To všetko má za následok zvýšenie medze únavy o 20 až 80%. V automobilovom priemysle sa valčekovanie využíva hlavne u rotačných súčastí spevňovaných v mieste vrubu (kľukové hriadele, nápravy), ale aj inde (päty zubov ozubených kolies, čapy atď.). [1][8]

### 3.2.2 GULIČKOVANIE

Je to riadený proces (prebieha v špeciálnych komorách), pri ktorom sa veľké množstvo oceľových guľčiek tryská na povrch súčasti pomocou prúdu stlačeného vzduchu. To vedie k vytvoreniu vysokých tlakových zvyškových pnutí  $(0,1 \div 0,5) \cdot R_m$  vo vrstve hrúbky  $(0,1 \div 0,3) \text{ mm}$ . Tieto pnutia pôsobia priaznivým účinkom na zvieranie únavových trhliniek a bránia ich rastu. Zvýšenie medze únavy leštených častí nie je síce výrazné (prejaví sa vplyv povrchových „kráterov“), ale aplikácia na reálne hrubé opracované povrchy zlepšuje únavovú pevnosť o 30 až 40%. Guličkovanie sa tak využíva u ozubených kolies, spojovacích a hnacích hriadeľov, piestov motorov atď. Ďalej má jeho využitie z hľadiska únavy materiálu opodstatnenie u exponovaných miest výkrovkov (napr.: kľukové hriadele), listových, torzných a vinutých pružín. [1][8]



Obr. 13 Princíp vplyvu guličkovania na povrch materiálu [12]

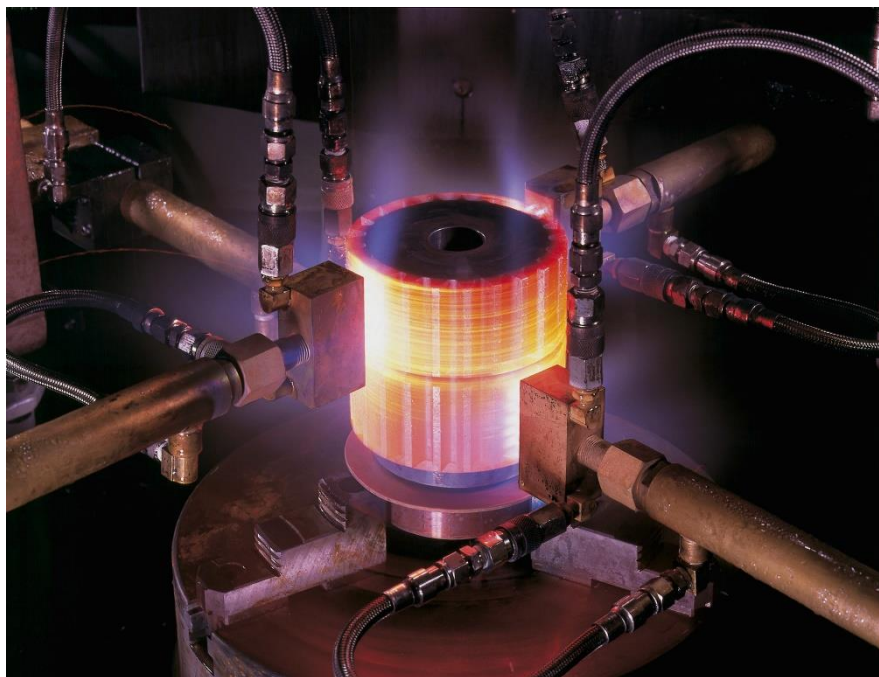


## 4 TEPELNÉ ÚPRAVY POVRCHU

Medzi tepelné úpravy povrchu radíme povrchové kalenie, ktorého cieľom je hlavne zvýšenie tvrdosti povrchu. Spočíva v čo možno najrýchlejšom ohreve kalenej plochy tesne pod teplotu tavenia daného materiálu na tzv. austenitizačnú alebo kaliacu teplotu, aby sa stačil prehriať povrch do určenej hĺbky. Po dosiahnutí požadovanej teploty a krátkej výdrži na nej nasleduje rýchle ochladenie. Pri tomto procese dochádza za súčasného zachovania húževnatého jadra (pôvodná štruktúra materiálu) k rozpadu austenitu a zakalená povrchová vrstva má martenzitickú štruktúru. So zvyšujúcou sa rýchlosťou ohrevu rastie aj rýchlosť nukleácie zárodkov austenitu. To spôsobuje, že povrchové kalenie vedie ku zjemneniu austenitického zrna tým aj výsledného martenzitu. Zjemnenie vedie k zvýšeniu tvrdosti pri zachovaní dostatočnej húževnatosti povrchovej vrstvy, ktorá je potom menej náchylná k vzniku a šíreniu trhlín. Keďže má martenzit väčší objem ako ferit, vznikajú v zakalenej vrstve vnútorne tlakové pnutia až do veľkosti 800Mpa, ktoré zvyšujú únavovú pevnosť. [2] U tvarovo zložitejších súčastí sa povrchové kalenie hladkých častí často kombinuje s mechanickým valčekomávaním prechodov do vrubov. [13][14]

### 4.1 POVRCHOVÉ KALENIE PLAMEŇOM

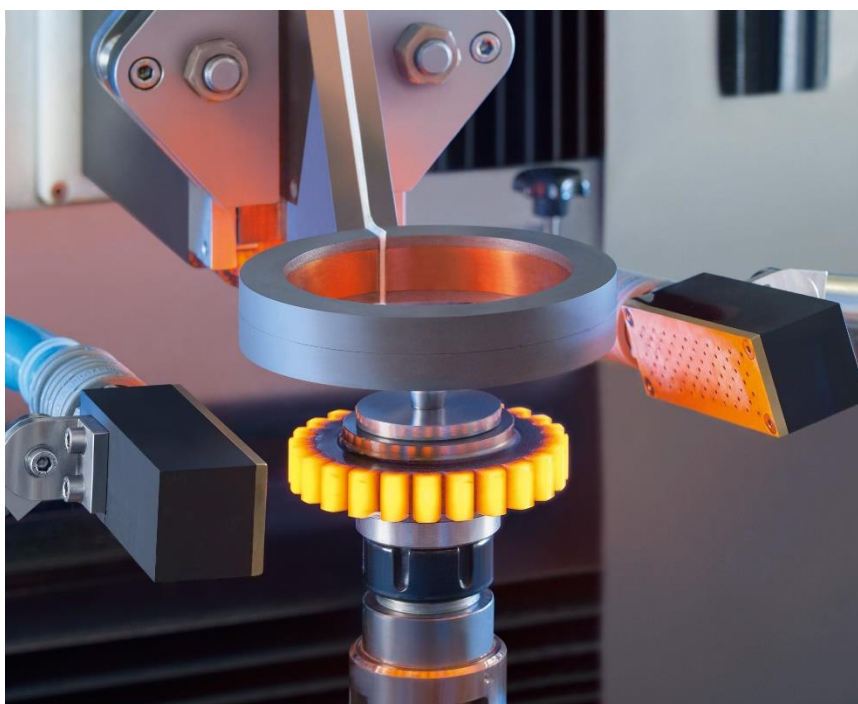
Je to najstaršia metóda povrchového kalenia. Teplo je predávané povrchu prostredníctvom plameňa horáku a odtiaľ sa šíri pod povrch len vedením. Plameň spaľuje kyslík v kombinácii s vhodným plynom, najčastejšie je to acetylén alebo svietiplyn. Pri kalení plameňom je hĺbka ohrevu daná relatívnou rýchlosťou pohybu plameňa po povrchu. Vrstva prehriatia dosahuje 1 až 6mm pod povrchom, preto je táto metóda vhodná pre rozmernejšie súčasti jednoduchých tvarov. Nadkritických rýchlostí ochladzovania, ktoré sú nevyhnutné pre vznik martenzitickej štruktúry sa dosahuje ochladzovaním do vody alebo oleja. [13]



*Obr. 14 Kalenie plameňom [15]*

## 4.2 POVRCHOVÉ KALENIE INDUKČNÝMI PRÚDMI

Pri indukčnom kalení vzniká teplo prechodom vysokofrekvenčných vírivých prúdov ohrievaným telesom, ktoré musí byť elektricky vodivé. V tomto predmete sa indukuje magnetické pole a vznikajú Foucaltové vírivé prúdy, ktoré majú najväčší účinok na povrchu kalenej súčasti. Hĺbka ohriatej vrstvy dosahuje 1 až 6mm a je závislá na rýchlosti, dobe ohrevu a nepriamo úmerná od frekvencie vírivých prúdov indukovaných vodičom, tzv. induktorom. Induktor je tvorený cievkou alebo slučkou, do ktorej sa kalený predmet vkladá. Po ohriatí povrchovej vrstvy na kaliacu teplotu nasleduje tak ako pri kalení plameňom prudké ochladenie. [13]



*Obr. 15 Indukčné kalenie [16]*

## 4.3 POVRCHOVÉ KALENIE LASEROM

Je to najmodernejšia metóda. K ohrevu povrchu kalenej súčasti na austenitizačnú teplotu slúži vysoko energetické žiarenie laseru. Hlavnou výhodou kalenia laserom je rýchlosť predania tepla, zakalenia a minimálna veľkosť tepelne ovplyvneného pásma v okolí zakalenej vrstvy. To spôsobuje minimálne deformácie po zakalení. Ďalšou výhodou je, že pri kalení laserom sa nemusí chladiť povrch zvonku tzv. chladiacim médiom (voda, olej). Keďže jadro materiálu zostáva studené, je po samotnom kalení teplo odvádzané vedením smerom do materiálu. Hĺbka zakalenej vrstvy sa pohybuje od 0,1 do 2mm, preto je laserové kalenie vhodné aj u menších súčastí. Využíva sa hlavne na ozubené kolesá, pastorky, hriadele, čapy a ďalšie časti motorov a prevodoviek. [14]



## 5 CHEMICKO-TEPELNÉ ÚPRAVY POVRCHU

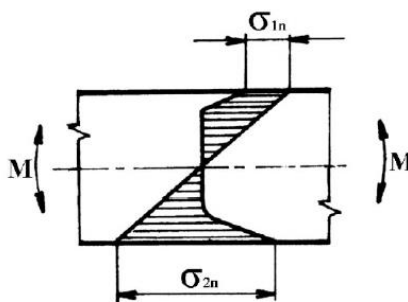
Sú to metódy, pri ktorých sa využíva vplyv zvýšenej teploty spoločne s chemickým alebo resp. fyzikálne chemickým pôsobením okolitého prostredia na povrch materiálu. Výsledkom je zmena chemického zloženia povrchu a tým aj vlastností súčasti. V praxi najvyužívanejšie je cementovanie, nitridovanie, karbonitridovanie a nitrocementovanie. [17]

### 5.1 CEMENTÁCIA

Pri cementácii sa povrch nízkouhlíkových alebo zliatinových ocelí o obsahu uhlíku 0,08-0,25% sýti uhlíkom na koncentráciu 0,8 až 1,1%. Veľkosť cementačnej vrstvy sa pohybuje od 0,1 do 1,5mm. Štruktúra povrchu je po ochladení perlitická s malým podielom voľného cementitu. Následne sa súčasť zakalí. Zakalená cementačná vrstva je tvorená martenzitom s najväčším obsahom uhlíku a najvyššou tvrdosťou (až 60HRC). [13] V jadre dochádza v závislosti na prekaliteľnosti a veľkosti prierezu súčasti len k čiastočnému prekaleniu. Výsledná štruktúra má vzhľadom k nižšiemu obsahu uhlíku nižšiu tvrdosť a v porovnaní z povrchovou vrstvou aj dostatočnú húževnatosť a plasticitu. Vysoká tvrdosť a priaznivé tlakové pnutia až do veľkosti 600MPa v povrchovej vrstve súčasti po cementovaní zvyšujú nielen únavovú životnosť, ale aj odolnosť voči opotrebeniu a kontaktnú únosnosť. Dnes už je cementácia menej využívaná. Metódy cementovania sú: cementovanie v prášku (tuhom prostredí), cementovanie v riadenej plynnej atmosfére a tzv. vákuová cementácia. [17]

### 5.2 NITRIDÁCIA

Je to proces, pri ktorom dochádza k difúznemu sýteniu povrchu zušľachtiteľných špeciálnych ocelí atómami dusíku, ktorý sa zlučuje s železom a prítomnými prísadovými prvkami (Al, Cr, W, Mo) na tvrdé nitridy. V praxi sa uplatňuje nitridovanie v plynnom prostredí, v soľnej lázni a najmodernejšou metódou je tzv. plazmová nitridácia. Výhodou nitridovania je, že vysokých hodnôt tvrdosti sa dosahuje bez ďalšieho zakalenia povrchu. Na povrchu vznikajú tlakové pnutia o veľkosti 200 až 700Mpa. [2] Tvrdosť nitridovaného povrchu je približne štvornásobná v porovnaní so základným materiálom a dosahuje až 1200 HV. Dôsledkom týchto úprav je výrazne zvýšenie únavovej životnosti, asi o 25% a súčasne dochádza k výraznému zvýšeniu odolnosti povrchu voči korózii a otláčeniu. Týmto spôsobom sa upravuje veľké množstvo súčasti v automobilovom a leteckom priemysle, u ktorých je riziko poškodenia únavovým lomom, otláčením a koróziou, ako sú napr. ozubené kolesá, kľukové a vačkové hriadele. [13][18]

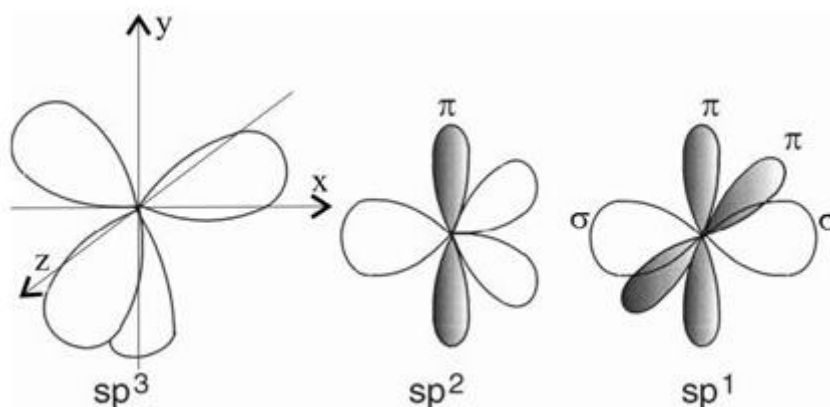


Obr. 16 Priebeh vnútorných napätí v hladkej tyči namáhanej na ohyb zušľachtenej plazmovou nitridáciou [18]

## 6 DLC VRSTVY

Radia sa k moderným povrchovým úpravám. Sú to veľmi tenké povlaky s unikátnymi mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami ako je vysoká tvrdosť, priesvitnosť a výborné tribologické vlastnosti. Takýmito vlastnosťami disponuje najtvrdší známy materiál, diamant, ktorý je však príliš drahý. Riešenie predstavujú práve DLC (z anglickej skratky: „diamond like carbon“) povlaky. Jedná sa o vrstvy obsahujúce uhlík v metastabilnom stave s významným podielom  $sp^3$  a  $sp^2$  väzieb. Ako DLC sa označujú aj amorfne uhlíkové materiály dopované vodíkom.

Uhlík tvorí veľkú škálu kryštalickej a neusporiadanej štruktúry, pretože existuje v troch rôznych hybridizačných stavoch  $sp^1$ ,  $sp^2$  a  $sp^3$ . V konfigurácii  $sp^1$ , dva zo štyroch valenčných elektrónov tvoria  $\pi$  väzbu v smere osy  $x$  a zvyšné dva tvoria  $\sigma$  väzbu v smeroch os  $y$  a  $z$ . V konfigurácii  $sp^2$  (ako u grafitu) tri zo štyroch valenčných elektrónov tvoria  $\sigma$  väzby v jednej rovine a štvrtý elektrón tvorí  $\pi$  väzbu. V  $sp^3$  (ako u diamantu) je každý zo štyroch valenčných elektrónov nasmerovaný do štvorstenu, čo umožňuje tvorbu veľmi silných  $\sigma$  väzieb k ďalším atómom. Práve prítomnosť týchto silných  $\sigma$  väzieb ma za následok zaujímavé mechanické vlastnosti DLC povlakov. [19]



Obr. 17 Hybridizačné stavy uhlíku [19]

Pre zvýšenie podielu  $sp^3$  väzieb v uhlíkových materiáloch sa vyvíjajú rôzne depozičné metódy. Jednou z metód je tzv. depozícia iónovým zväzkom. Pri depozícii iónovým zväzkom DLC vrstva kondenzuje zo zväzku uhlíkových iónov o zhruba stredných energiách  $\sim 100$  eV a dopadajúce ióny spôsobujú fyzikálny proces rastu vrstiev s  $sp^3$  väzbami. Existuje tiež chemický proces rastu vrstiev s  $sp^3$  väzbami, ako napr.: CVD metódy, kde chemický proces stabilizuje  $sp^3$  väzby. Jedna z najviac používaných metód v priemysle je naprašovanie. [19]

Využitie DLC vrstiev v automobilovom priemysle sa uplatňuje hlavne pri výrobe ložísk, kde sa zvyšuje odolnosť proti únave v dotyku a vďaka nízkemu súčiniteľu trenia povlaku dochádza k výraznému predĺženiu životnosti. Z hľadiska predĺženia únavového života v súčasnosti ale nenachádzajú DLC vrstvy širšie uplatnenie.

## 7 DIMENZOVANIE NA ÚNAVU

Získané poznatky o únavových vlastnostiach súčasti a režime jej zaťažovania uplatníme pri dimenzovaní súčasti na požadovanú životnosť. Metodiku dimenzovania rozdeľujeme následne:

- Návrh súčasti v oblasti časovanej pevnosti. (tzv. návrh na obmedzenú životnosť).
- Návrh súčasti v oblasti trvalej pevnosti, kde sa životnosť s veľkou pravdepodobnosťou blíži  $\infty$ .

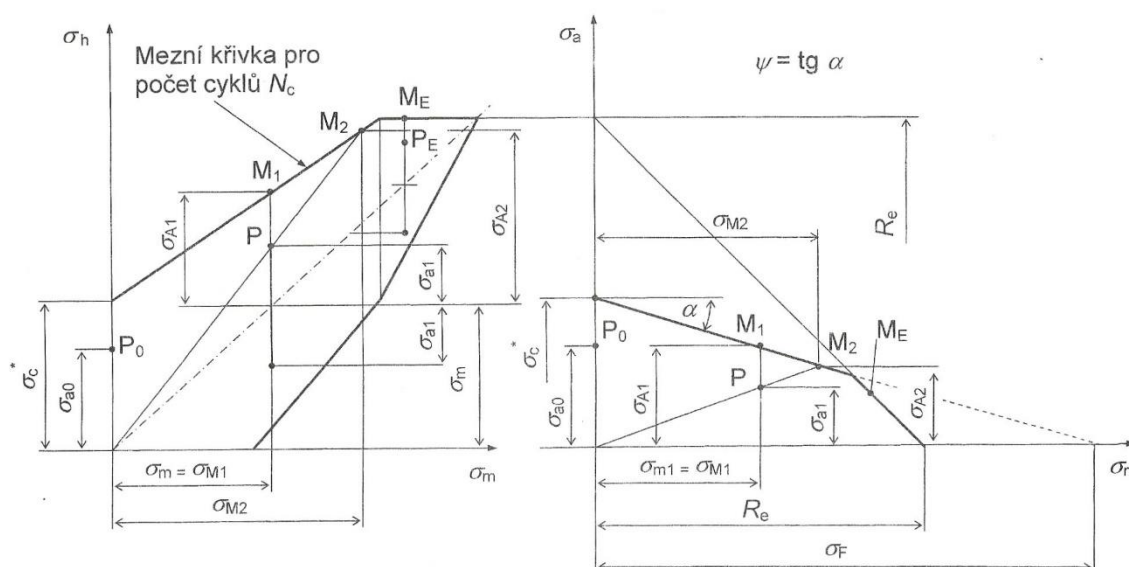
Dimenzovanie v oblasti časovanej pevnosti sa dnes využíva najmä v motoršporte. Počas požadovanej životnosti daný diel spoľahlivo plní svoju funkciu. Existuje však celá rada strojných súčasti, u ktorých je počet zaťažovacích cyklov počas požadovanej životnosti výrazne vyšší než počet cyklov na medzu únavy ( $N > 10^7$ ). Takéto súčasti sa dimenzujú v oblasti trvalej pevnosti. To znamená, že maximálne napätie, ktorým sú tieto diely zaťažované nesmie presiahnuť medzu únavy. Prakticky sa určuje tzv. súčiniteľ bezpečnosti súčasti  $k_c$  pre daný typ zaťažovania (ťah–tlak, ohyb, krut, kombinované zaťaženie) a pre daný typ kmitu (striedavý, mŕjavý, pulzujúci). Súčiniteľ bezpečnosti  $k_c$  je daný pomerom hodnôt na medznej čiare únavovej poruchy ku maximálnym prevádzkovým napätiam. [1][2]

### 7.1 TRVALÁ PEVNOSŤ–JEDNODUCHÉ NAMÁHANIE

Pri jednoduchom namáhaní (ťah, ohyb, krut) a pri súmerne striedavom cykle ( $R = -1$ ) je súčiniteľ bezpečnosti súčasti s medzou únavy  $\sigma_c^*$  ( $\sigma_{oc}^*$ ,  $\tau_c^*$ ) definovaný vzťahom:

$$k_c = \frac{\sigma_c^*}{\sigma_{a0}}; \quad k_c = \frac{\sigma_{oc}^*}{\sigma_{oa0}}; \text{ resp. } \quad k_c = \frac{\tau_c^*}{\tau_{a0}}. \quad (8)$$

Pri nesymetrickom zaťažovaní (obvykle  $\sigma_m > 0$ ) sa využíva k znázorneniu miery bezpečnosti vyznačenie záťažového kmitu o zložkách  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$  (prevádzkový bod P) v Haighovom alebo Smithovom diagrame (Obr.18). [2]



Obr. 18 Stanovenie bezpečnosti v Smithovom a Haighovom diagrame [2]



Pre  $\sigma_m = \text{konst.}$  (zaťažovacia dráha – úsečka PM<sub>1</sub> na Obr. 18) je súčiniteľ bezpečnosti definovaný ako:

$$k_c = \frac{\sigma_{A1}}{\sigma_a} = \frac{\sigma_c^* - \psi \cdot \sigma_m}{\sigma_a}. \quad (9)$$

Pre  $\sigma_a/\sigma_m = \text{konst.}$  (zaťažovacia dráha– úsečka PM<sub>2</sub> na Obr. 18) je súčiniteľ bezpečnosti definovaný ako:

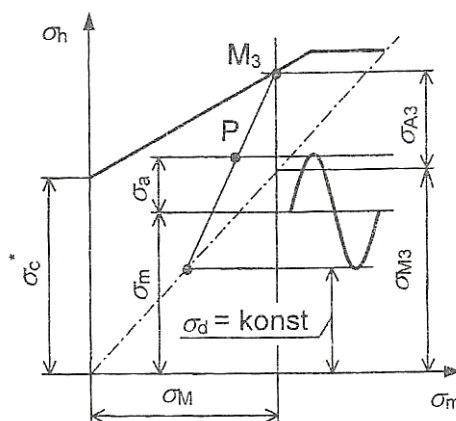
$$k_c = \frac{\sigma_{A2}}{\sigma_a} = \frac{\sigma_c^*}{\sigma_a + \psi \cdot \sigma_m}. \quad (10)$$

Pre  $\sigma_m > \sigma_a$  (tj. Zaťažovacia dráha –  $P_E M_E$  na Obr. 18), medzný bod  $M_E$  leží na medzi sklzu, je súčiniteľ bezpečnosti definovaný ako:

$$k_c = \frac{R_e}{\sigma_a + \sigma_m}. \quad (11)$$

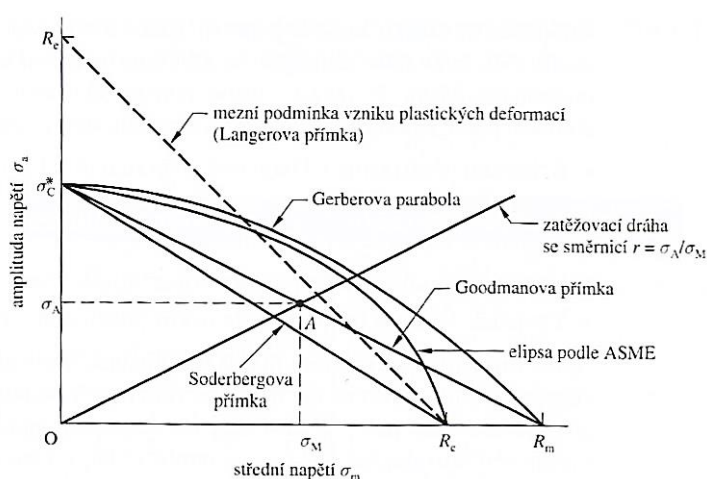
Zvláštny prípad zaťažovania je konštantné dolné napätie cyklu. Tento prípad je typický pre dynamické zaťažovanie skrutky s predpätím (*Obr. 19*). Bezpečnosť je definovaná ako:

$$k_c = \frac{\sigma_{A3}}{\sigma_a} = \frac{\sigma_c^* - \psi \cdot \sigma_d}{\sigma_a \cdot (1 + \psi)}. \quad (12)$$



Obr. 19 Cyklické namáhanie skrutky s predpätím [2]

Na *Obr. 18* predstavuje zvýraznená krivka kombináciu Goodmanovho kritéria bezpečnosti a Langerovej priamky—medzná podmienka vzniku plastických deformácií. Ďalšie kritéria únavového porušenia sú zobrazené v Haighovom diagrame na *Obr. 20*. Určujúce rovnice jednotlivých kritérií a prislúchajúce bezpečnosti pre konštantnú smernicu zaťažovacej dráhy  $\sigma_a/\sigma_m = r$  sú v *Tab. 4*.



Obr. 20 Kritéria únavovej životnosti pre jednoduché namáhanie [3]

Tab. 4 Súčinitele bezpečnosti k únave pre jednotlivé kritéria [3]

kritérium	určujúca rovnica	súčiniteľ bezpečnosti
Soderbergova priamka	$\frac{\sigma_A}{\sigma_c^*} + \frac{\sigma_M}{R_e} = 1 \quad (13)$	$k_c = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_c^*} + \frac{\sigma_m}{R_e}} \quad (14)$
Goodmanova priamka	$\frac{\sigma_A}{\sigma_c^*} + \frac{\sigma_M}{\sigma_F} = 1 \quad (15)$	$k_c = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_c^*} + \frac{\sigma_m}{\sigma_F}} \quad (16)$
Gerberova parabola	$\frac{\sigma_A}{\sigma_c^*} + \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_F}\right)^2 = 1 \quad (17)$	$k_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_F}{\sigma_m}\right)^2 \frac{\sigma_a}{\sigma_c^*} \left[ -1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\sigma_m\sigma_c^*}{\sigma_F\sigma_a}\right)^2} \right] \quad (18)$
Elipsa podľa ASME	$\left(\frac{\sigma_A}{\sigma_c^*}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{R_e}\right)^2 = 1 \quad (19)$	$k_c = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_c^*}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{R_e}\right)^2}} \quad (20)$

Vzorec (16) dostaneme po dosadení za  $\psi$  a úprave vzťahu (10). Vzorce (9) až (20) sú definované pre namáhanie ťahom. Po dosadení príslušných napätí tak ako je to vyjadrené vo vzorcoch (8) platia analogicky pre namáhanie v ohybe aj krute. Hodnoty fiktívneho napätia  $\sigma_F$  sú uvedené v kapitole 1.3.2 a pre medzu sklzu platia následné vzťahy [2]:

$R_e$  – medza sklzu v ťahu,

$R_{eo} = 1,2 \div 1,4 R_e$  – medza sklzu v ohybe,

$R_{ek} = 0,6 \div 0,7 R_e$  – medza sklzu v krute.



## 7.2 TRVALÁ PEVNOST–KOMBINOVANÉ NAMÁHANIE

Veľa skutočných strojných súčastí je v prevádzke namáhaných viacosím namáhaním, ktoré v nich vyvoláva zložitú priestorovú napätosť. Najčastejšie sa jedná o kombináciu ťah–krut a ohyb–krut. Vo vysokocyklickej oblasti je súčasť v makroskopicky elastickom stave. Z tohto dôvodu sa k posúdeniu únavovej životnosti uplatňujú napät'ové kritéria. Ku grafickému znázorneniu dosiahnutej miery bezpečnosti si môžeme definovať rovinu medzných napätí  $\sigma$ ,  $\tau$ . V tejto rovine predstavujú jednotlivé kritéria krivku bezpečnosti. Prevádzkovému zaťaženiu súčasti  $\sigma_a$ ,  $\tau_a$  prislúcha bod P. Ak sa tento bod nachádza pod krivkou daného kritéria teoreticky nedôjde k únavovému porušeniu. Obecné vieme zapísať všetky kritéria v tvare:

$$a \cdot f(C) + b \cdot g(N) \leq f_{-1}, \quad (21)$$

kde

$a, b$  – multiaxiálne únavové parametre, vyjadrené v závislosti na  $f_{-1}$ ,  $t_{-1}$ ,

$f(C)$  – šmyková zložka napätia,

$g(N)$  – normálová zložka napätia,

$f_{-1}$  – medza únavy v ťahu–tlaku resp. ohybe za rotácie pre striedavý symetrický cyklus ( $R = -1$ ),

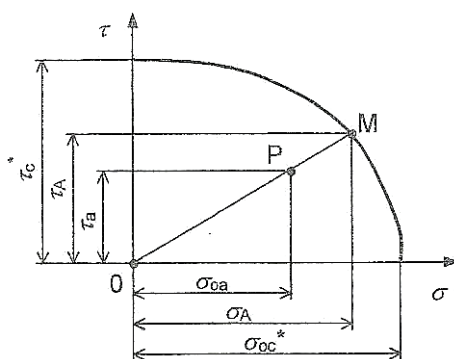
$t_{-1}$  – medza únavy v krute pre striedavý symetrický cyklus ( $R = -1$ ).

Predpokladá sa že šmyková zložka C bude mať dominantný vplyv na únavové porušovanie, zatiaľ čo od normálovej zložky N sa očakáva nejaký vedľajší efekt.

### 7.2.1 EMPIRICKÉ KRITÉRIA

Najjednoduchším a často využívaným je Gough–Pollardovo kritérium. Je to empirické kritérium vychádzajúce s predpokladu podobnosti medzi statickou a cyklickou pevnosťou. Uplatňuje sa pre najčastejšiu kombináciu ohyb–krut. Kritérium vyjadruje medznú eliptickú čiaru v tvare:

$$\frac{\sigma_A^2}{\sigma_{oc}^{*2}} + \frac{\tau_A^2}{\tau_c^{*2}} = 1. \quad (22)$$



Obr. 21 Bezpečnosť pri kombinovanom namáhaní ohyb–krut [2]

Pri striedavo súmernom zaťažení v ohybe a krute, a pri  $\tau_a/\sigma_a = \text{konst}$ . Je výsledná bezpečnosť daná dĺžkami úsečiek:



$$k_c = \frac{OM}{OP}. \quad (23)$$

Dosadením do rovnice (22) a úpravách dostávame pre bezpečnosť vzťahy:

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_{oc}^*}{\sigma_{oa}}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{\tau_c^*}{\tau_a}\right)^2} = \frac{1}{k_{\sigma o}^2} + \frac{1}{k_{\tau}^2}, \quad (24)$$

$$k_c = \frac{k_{\sigma o} k_{\tau}}{\sqrt{k_{\sigma o}^2 + k_{\tau}^2}}. \quad (25)$$

Ak je pri kombinovanom zaťažovaní jedna zložka statická (napr. konštantný krútiaci moment,  $\tau_m = \text{konst.}, \tau_a = 0$ ), potom do vzťahu (25) dosadíme príslušnú statickú zložku vypočítanú podľa vzťahov:

$$k_{\sigma} = \frac{R_e}{\sigma_m}, \quad k_{\sigma o} = \frac{R_{eo}}{\sigma_{mo}}, \text{ resp. } k_{\tau} = \frac{R_{ek}}{\tau_m}. \quad (26)$$

Pre nesymetrický priebeh zaťažovania  $\sigma-\tau$  najprv určíme bezpečnosti pre jednoduchú napätosť  $k_{\sigma o}$  a  $k_{\tau}$  spôsobom podľa kapitoly 7.1. Výslednú bezpečnosť dostaneme po dosadení jednotlivých bezpečností do vzťahu (25).

### 7.2.2 KRITÉRIA VYCHÁDZAJÚCE Z KRITICKEJ ROVINY

Ďalšie napät'ové multiaxiálne kritéria využívané modernými výpočtovými programami vychádzajú z teórie nájdenia kritickej roviny. V kritickej rovine je pôsobiace šmykové napätie maximálne resp. príslušná kombinácia šmykového a normálového napätia maximálna. Predpokladá sa že práve v tejto rovine dôjde ku vzniku a následnému šíreniu únavovej trhliny. Jedným z najviac využívaných kritérií z tejto kategórie je McDiarmidovo kritérium:

$$\frac{C_a}{t_{AB}} + \frac{N_{max}}{2R_m} \leq 1, \quad (27)$$

kde

$C_a$  – maximálne šmykové napätie,

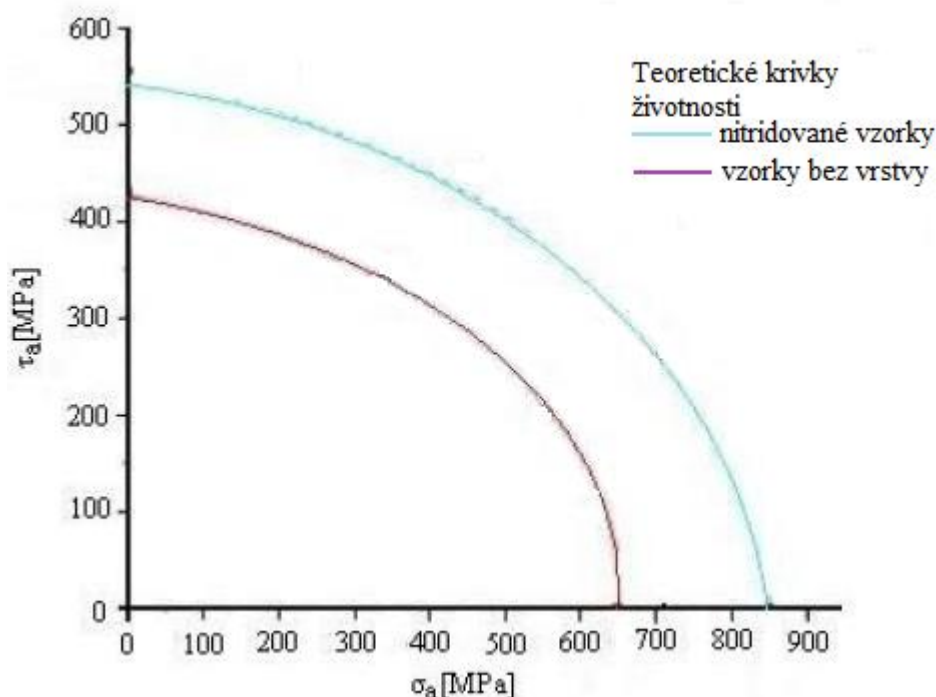
$N_{max}$  – maximálne normálové napätie,

$t_{AB}$  – medza únavy v krute pre prípady A,B.

Pre typ zaťažovania A je charakteristická trhlina šíriaca sa rovnobežne s povrchom, naopak pre typ zaťažovania B sa trhlina šíri z povrchu smerom do materiálu. Toto rozlíšenie musíme vždy vziať do úvahy. Pre zaťažovanie kombináciou krutu a ohybu s prevahou krutu nastáva prípad A, kde  $t_A = \tau_c$ . [20]

Amplitúdy napätia od ohybu aj krutu pôsobia na povrchu súčasti. Zvyškové tlakové napätia v povrchovej vrstve súčasti pôsobia proti maximálnemu napätiu od cyklického kombinovaného zaťažovania. Z rovnice (27) vyplýva, že čím menšie budú hodnoty  $C_a$  a  $N_{max}$ , tým vyššia bude bezpečnosť súčasti pre dané zaťažovanie k základnej medzi únavy materiálu. Grafické porovnanie hraničnej krivky únavového života McDiarmidovho kritéria pre nitridované vzorky a vzorky bez vrstvy je na Obr. 22.





Obr. 22 Medzné krivky životnosti pre McDiarmidové kritérium [18]

### 7.3 VOĽBA SÚČINITEĽOV BEZPEČNOSTI

Hodnota bezpečnosti v únave  $k_c$ , spočítaná niektorým z uvedených postupov musí byť rovnaká alebo väčšia ako minimálna prípustná hodnota bezpečnosti  $k_{min}$  pre daný prípad. Pri voľbe minimálnej bezpečnosti berieme do úvahy nasledujúce okolnosti:

- Spoľahlivosť a kvalita informácií o prevádzkovom zaťažení súčasti
- Vierohodnosť podkladov o medzi únavy materiálu a danej súčasti (štatistické posúdenie, empirické či experimentálne dáta)
- Technológia výroby a kvalita kontroly
- Pracovné prostredie a časová degradácia vlastností
- Závislosť ľudského života a ekonomických škôd na zlyhaní súčasti

Pri vierohodných informáciách spomenutých faktorov (podložených únavovými skúškami), a v prípade keď pri poruche súčasti nedôjde k strate na životoch ani k veľkým ekonomickým ujмам volíme  $k_{min}=1,2\div 1,3$ . Pri neúplných požadovaných informáciách volíme  $k_{min}=1,5$ . Ak nevieme výpočet doložiť experimentami, nemáme dostatok informácií o zaťažení a nevieme zaručiť dodržanie výrobnéj technológie a správnej kontroly volíme  $k_{min}=2\div 3$ . Vyššie súčinitele  $k_{min}$  volíme v prípade, že zlyhanie súčasti resp. daného zariadenia môže spôsobiť haváriu. Bezpečnosť, ktorá je v takýchto prípadoch značne predimenzovaná, udáva norma. [1][2]





## ZÁVER

Táto práca sa venuje problematike dynamického zaťažovania vo vysokocyklickej oblasti. Objasňuje analytický postup návrhu súčasti pri dimenzovaní na trvalú únavovú pevnosť. Približuje kritéria jednoduchého namáhania, ako aj niektoré využívané kritéria viacosého namáhania. Hlavnou náplňou predloženej práce je rozdelenie a popis jednotlivých dnes využívaných metód technológie úpravy povrchu a nanášania povrchových vrstiev za účelom zvýšenia únavovej životnosti.

V závere treba dodať, že žiadna metóda predikcie únavovej životnosti strojných súčastí nie je stopercentne presná a slúži viac menej k predbežnej kontrole funkčnej spôsobilosti daného dielu. To je spôsobené nemožnosťou presne vyčíslit' jednotlivé faktory vplývajúce na únavovú pevnosť. Inak tomu nie je ani pri uvažovaní vplyvu povrchovej vrstvy, ktorý je možné zahrnúť do výpočtov len približne na základe predchádzajúcich únavových skúšok a skúseností.



## POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] RŮŽIČKA, M., HANKE, M., ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Druhé vydání, Praha: České vysoké učení technické, 1992, 259 s.
- [2] MORAVEC, V., PIŠTÁČEK, D. *Pevnost a životnost dynamicky namáhaných strojních součástí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, 100 s. ISBN 80-248-0980-9.
- [3] SHIGLEY, E. J., MISCHKE, R. Ch., BUDYNAS, G. R. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. V Brně: VUTUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [4] VLK, M. *Dynamická pevnost a životnost*. 2., přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 223 s.
- [5] ONDRÁČEK, E., JANÍČEK, P., VRBKA, J. *Mechanika těles - pružnost a pevnost II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 262 s. ISBN 80-214-2214-9.
- [6] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B., MAZAL, P., LIŠKUTÍN, P. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu: závěrečná zpráva o řešení grantového úkolu GAČR 101/02/0802*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 261 s. ISBN 80-7204-373-0.
- [7] HUMÁR, A. *Technologie I*. [online]. Technologie obrábění-3.část. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologieII.pdf>>
- [8] VAJSKEBR, J., ŠPETA, Z. *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984, 181 s.
- [9] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 80-7204-722-2.
- [10] DÖMÉNY, T. *Analýza vlivu parametrů procesu broušení na integritu obrobené plochy se zaměřením na zbytková napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 65 s, příloh. 2. Vedoucí diplomové práce: Ing. Ildikó Putzová, Ph.D.
- [11] Alibaba.com [online], 2015. [cit. 2015-04-17]. Dostupný z WWW: <[http://orkuncuk.fm.alibaba.com/products/showimg/147855667-101839058/CRANKSHAFT\\_GRINDING\\_MACHINE.html](http://orkuncuk.fm.alibaba.com/products/showimg/147855667-101839058/CRANKSHAFT_GRINDING_MACHINE.html)>
- [12] Integrita.zcu.cz [online], 2013. [cit. 2015-04-17]. Dostupný z WWW: <[http://integrita.zcu.cz/download/skola2/zilina\\_prez4.pdf](http://integrita.zcu.cz/download/skola2/zilina_prez4.pdf)>
- [13] STRACHOTA, A., TIKAL, V., HAVLÍČEK, M. *Povrchové kalení plamenem v praxi*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, 169 s.



- [14] Schejbal, M. *Vliv laserem kalené povrchové vrstvy na velikost řezných sil při frézování*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2012, 92 s. Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Milan Honner, Ph.D.
- [15] flametreatingsystems.com [online], 2014. [cit. 2015-04-20]. Dostupný z WWW: <[http://flametreatingsystems.com/wp-content/uploads/2014/11/HERO\\_RGB.jpg](http://flametreatingsystems.com/wp-content/uploads/2014/11/HERO_RGB.jpg)>
- [16] emag.com [online], 2015. [cit. 2015-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.emag.com/machines/applications/technologies/induction-hardening/induction-hardening.html>>
- [17] BÍLKOVÁ, L. *Nízkoteplotní a kryogenní zpracování cementačních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.
- [18] MAJOR, Š. *Vliv plasmové nitridace na únavovou životnost vysocepevných ocelí při biaxiálním zatěžování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 149 s.
- [19] mmspektrum.com [online], 2013. [cit. 2015-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu.html>>
- [20] PAPUGA, J. *Mapping of Fatigue Damages – Program Shell of FE-Calculatation*. PhD Thesis: Mechanics of Solids, Deformable Bodies and Continua branch, CTU in Prague, 2005, 115 s.
- [21] KOŽOUŠEK, J. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1983. 483 s.
- [22] NOVOTNÝ, P. *Řešení únavové životnosti součástí*. Brno: VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2011. Podklady k předmětu Výpočtové modely.
- [23] novexa.com [online], 2015. [cit. 2015-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.novexa.com/images/galerie/gd/pitting1.jpg>>
- [24] Poduška, J. *Teorie únavy materiálu*. Brno: VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2014. Podklady k předmětu Pružnost a pevnost II.



## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

$\Delta\sigma$	[MPa]	rozkmít
a	[–]	multiaxiálny únavový parameter
b	[–]	multiaxiálny únavový parameter
$C_a$	[MPa]	maximálne šmykové napätie
CVD		chemical vapour deposit
DLC		diamond like carbon
f(C)	[MPa]	šmyková zložka napätia
$f_{-1}$	[MPa]	medza únavy v ťahu–tlaku resp. ohybe za rotácie pre striedavý symetrický cyklus
g(N)	[MPa]	normálová zložka napätia
HRC	[–]	tvrdosť podľa Rockwella
HRV	[–]	tvrdosť podľa Vickersa
$k_a$	[–]	súčiniteľ vplyvu akosti povrchu
$k_b$	[–]	súčiniteľ vplyvu veľkosti telesa
$k_c$	[–]	súčiniteľ vplyvu spôsobu zaťažovania
$k_c$	[–]	súčiniteľ bezpečnosti v únave
$k_d$	[–]	súčiniteľ vplyvu teploty
$k_e$	[–]	súčiniteľ spoľahlivosti
$k_f$	[–]	súčiniteľ zahrňujúci ďalšie vplyvy
$k_{min}$	[–]	minimálna bezpečnosť
N	[–]	počet záťažových cyklov
$N_{max}$	[MPa]	maximálne normálové napätie
R	[–]	koefficient nesúmernosti (asymetrie) kmitu
Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	drsnosť povrchu
$R_e$	[MPa]	medza sklzu materiálu
$R_m$	[MPa]	medza pevnosti materiálu
T	[–]	perióda kmitu
$t_{-1}$	[MPa]	medza únavy v krute pre striedavý symetrický cyklus
$t_{AB}$	[MPa]	medza únavy v krute pre prípady A,B
$\beta$	[–]	súčiniteľ vrubu
$\varepsilon$	[–]	súčiniteľ veľkosti súčasti



$\eta_1$	[-]	súčiniteľ akosti povrchu
$\eta_2$	[-]	súčiniteľ technologickej úpravy povrchovej vrstvy
$\eta_p$	[-]	súčiniteľ povrchu
$\pi$		elektrónová väzba
$\sigma$		elektrónová väzba
$\sigma_c^*$	[MPa]	medza únavy vrubovej súčasti v ťahu
$\sigma_{co}^*$	[MPa]	medza únavy vrubovej súčasti v ohybe
$\sigma'_{co}$	[MPa]	korigovaná medza únavy v kritickom mieste súčasti
$\sigma_a$	[MPa]	amplitúda napätia (výkmit)
$\sigma_c$	[MPa]	medza únavy materiálu v ťahu
$\sigma_d$	[MPa]	dolné napätie kmitu
$\sigma_F$	[MPa]	fiktívne napätie
$\sigma_h$	[MPa]	horné napätie kmitu
$\sigma_m$	[MPa]	stredné napätie kmitu
$\sigma_{oc}$	[MPa]	medza únavy materiálu v ohybe
$\tau_c^*$	[MPa]	medza únavy vrubovej súčasti v krute
$\tau_c$	[MPa]	medza únavy materiálu v krute
$\psi$	[-]	citlivosť k asymetrii cyklu